

Modelando exposición y sensibilidad de ecosistemas bajo escenarios de cambio climático, incertidumbres y asuntos de escala

Pablo Imbach
Bruno Locatelli

Curso Internacional: “Adaptación al Cambio Climático: el rol de los servicios ecosistémicos”.

CATIE, Turrialba, Costa Rica, 9 al 13 de noviembre de 2009



Objetivos

- Conocimiento sobre algunos tipos de modelos y sus alcances sobre los impactos del CC
 - Enfoques para modelaje
 - Tipos de modelos: ventajas y limitaciones
 - Ejemplos sobre manejo de incertidumbre



Dos paradigmas (Gitay et al., 2002)

- **Movimiento de ecosistemas** → **Modelos biogeográficos**
 - Migración de especies y ecosistemas
 - Problema: los ecosistemas podrían no poder moverse debido a que las especies de un ecosistema tienen diferentes tolerancias al clima y capacidades de migración
 - Otra dificultad: efecto de las especies invasivas en los ecosistemas
 - **Modificación de ecosistemas**
 - Extinción de comunidades de vida silvestre, cambios en la fenología, estrés térmico, precipitación, productividad, propagación de plagas (menos días fríos), daños (tormentas), incendios, sequía
- Énfasis en la fisiología de ecosistemas (**modelos biogeoquímicos**).
- Énfasis en la composición y estructura de ecosistemas (**modelos de dinámica de comunidades**).

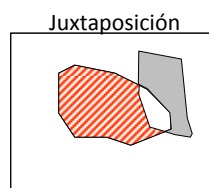
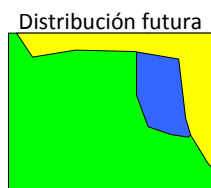
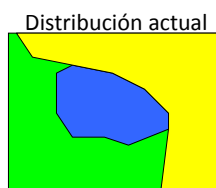
Modelos (Gitay et al., 2002)

1. Modelos con énfasis en biogeografía
 - Modelos de equilibrio en la estructura de la vegetación
2. Modelos con énfasis en ecofisiología
 - Modelos biogeoquímicos
3. Modelos con énfasis en composición y estructura de los ecosistemas
 - Modelos de dinámica de comunidades
4. Otros modelos no considerados:
 - Modelos de ecosistemas manejados
 - Cultivos agrícolas, pasturas y productividad forestal

(Goudriaan, 1999)

Modelos con énfasis en biogeografía

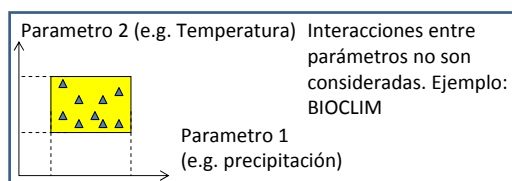
- Principio:
 - Establecer correlaciones entre estructura de los ecosistemas o presencia de especies y variables climáticas
 - Modelos de nicho ecológico
 - Uso de escenarios futuros de clima para estimar la distribución futura de especies o ecosistemas



Si el ecosistema azul es de mayor importancia, la juxtaposición de los dos mapas muestra las áreas vulnerables (en rojo) y los sitios donde la migración debe ser facilitada (gris)

Modelos biogeograficos: necesidad de datos y procedimientos

- Necesidad de datos:
 - Localización de especies o ecosistemas, parámetros climáticos
- Procedimientos:
 - En su expresión básica:



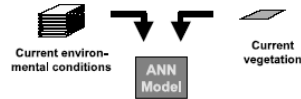
- Usan regresiones y probabilidades de ocurrencia (Austin, 1990)
- Algoritmos genéticos y redes neurales
 - GARP: Genetic Algorithms for Rule-Set Predictions (Stockwell and Peters, 1999)
 - Establecer una serie de reglas para predecir la presencia o ausencia de especies

Ejemplo: bioclimático con redes neurales

- Evalúa como el arreglo espacial de los patrones de bosque pueden dificultar el cambio en la vegetación
- Red neural artificial espacialmente estática (ANN)
- Ostendorf et al., 2001



Artificial Neural Network Generation



Combining the Output of the ANN with Spatial and Ecological Information

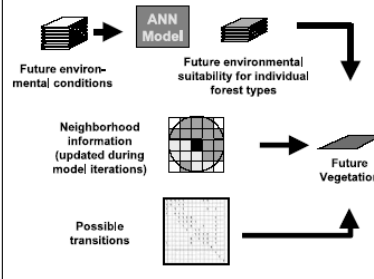
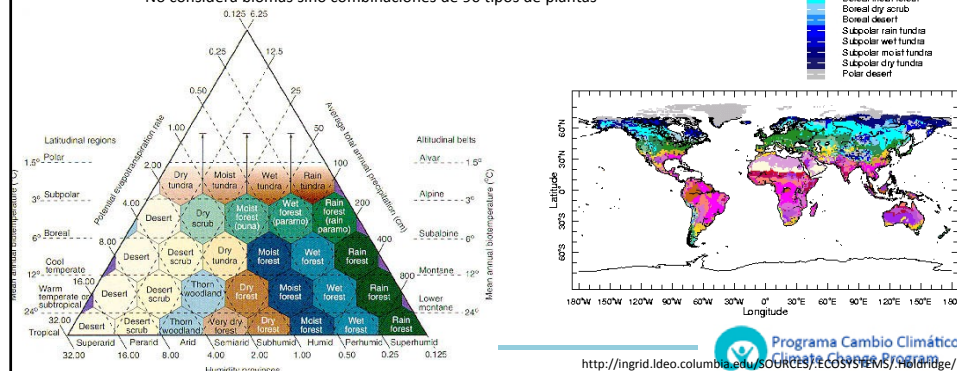


Fig. 2. Artificial neural network and combined model concepts. The network is trained using today's climate, geological information and terrain data (current environmental conditions). In the combined model, the predicted environmental suitability for different forest types is combined with the spatial structure of neighbourhood (note the selection of pixels falling into a circle) and information pertaining to ecologically likely or impossible transitions.

Ejemplo: modelos biogeográficos

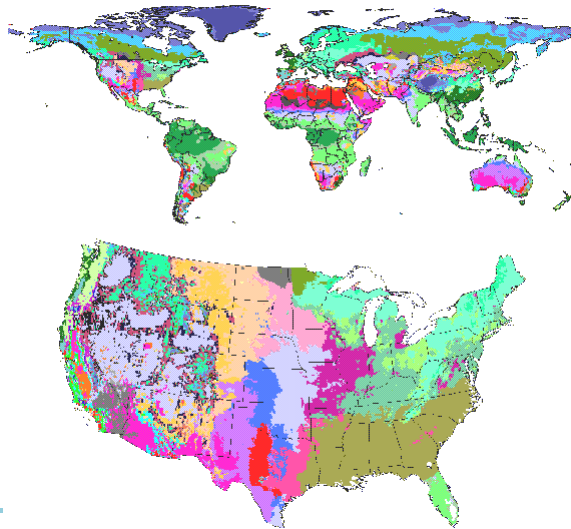
- El sistema de zonas de vida de Holdridge (Holdridge, 1947)
Examples:
 - Usado por Rapidel (2001) en Nicaragua
 - Emanuel et al. (1998) estudio de impacto del CC en la distribución de biomas
- Mejoras al sistema de Holdridge por Box (1981)
 - No considera biomas sino combinaciones de 90 tipos de plantas



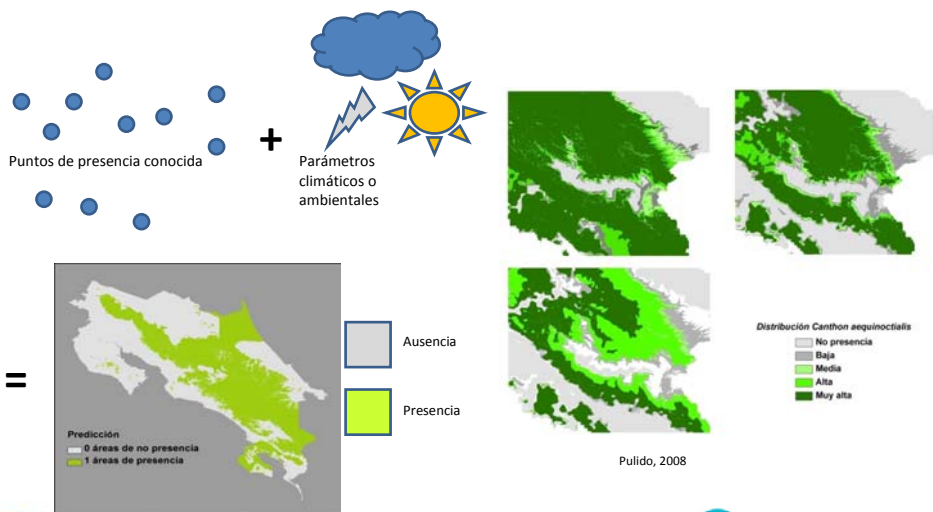
Ejemplo: modelos biogeográficos

- BIOME1
- MAPSS (Mapped Atmosphere-Plant-Soil System)
 - Neilson, 1995

MAPSS Simulated Vegetation Distribution - Current



Ejemplo: modelos biogeográficos (GARP)



Modelos biogeográficos aplicados

- Australia
 - Extinción del Golden Bower bird (Hilbert et al., 2004)
- Amazonas
 - Modelo bioclimático de especies de plantas + barreras para la migración y dispersión + retardo en la respuesta de las especies al CC
 - Conclusión: dramática pérdida en variabilidad de especies en el este de la Amazonía (Miles et al., 2004)

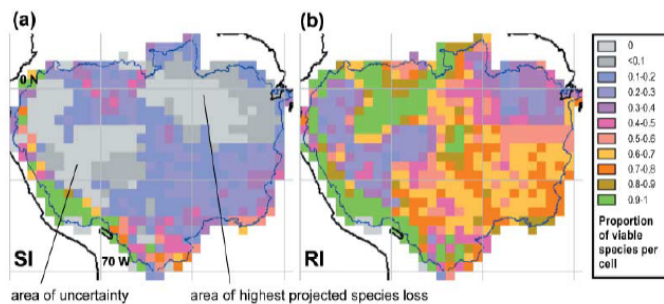


Figure 3 Proportion of species to retain viable populations at 2095 under (a) SI and (b) RI scenarios where 69 species have been modelled.

Ejemplo de modelos biogeográficos

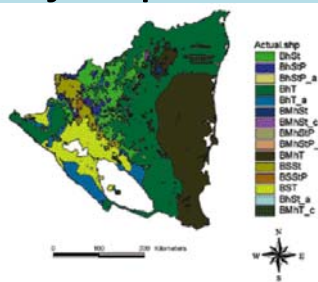


Figura 1. Mapa actual de zonas de vida de Holdridge para Nicaragua. Período: 1971-1990.

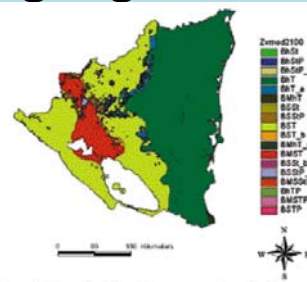


Figura 3. Zonas de vida ante un escenario moderado para el año 2100.

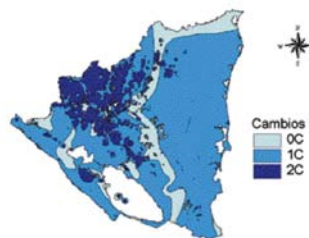
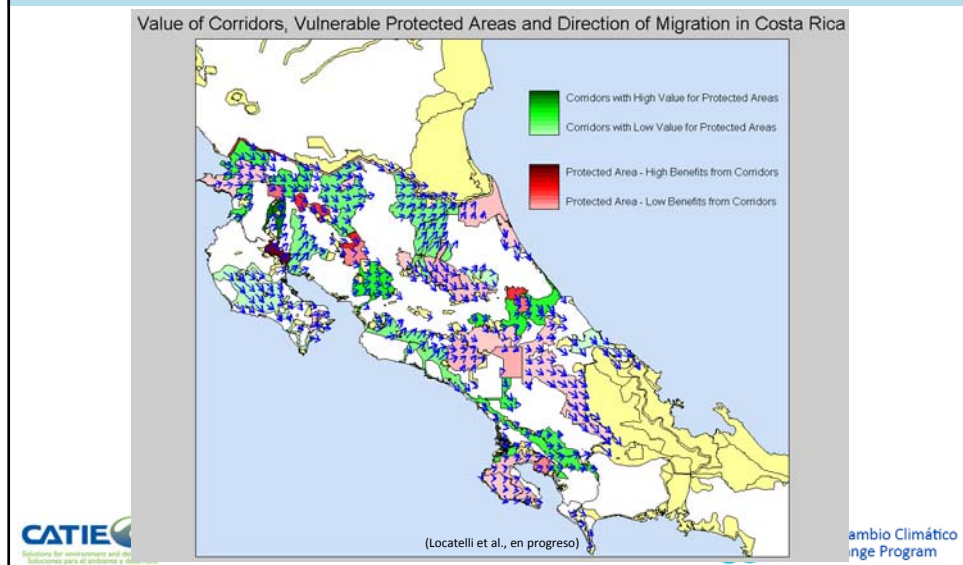


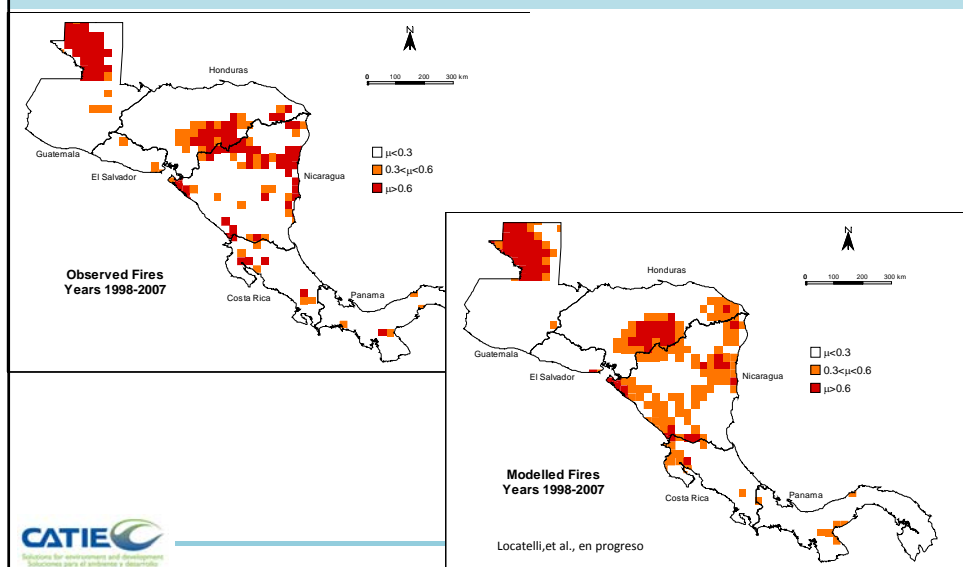
Figura 6. Sectores de Nicaragua que experimentan cambios en sus zonas de vida ante un escenario moderado.

(Mendoza et al., 2001)

Ejemplo de modelos biogeográficos



Ejemplo de enfoque biogeográfico

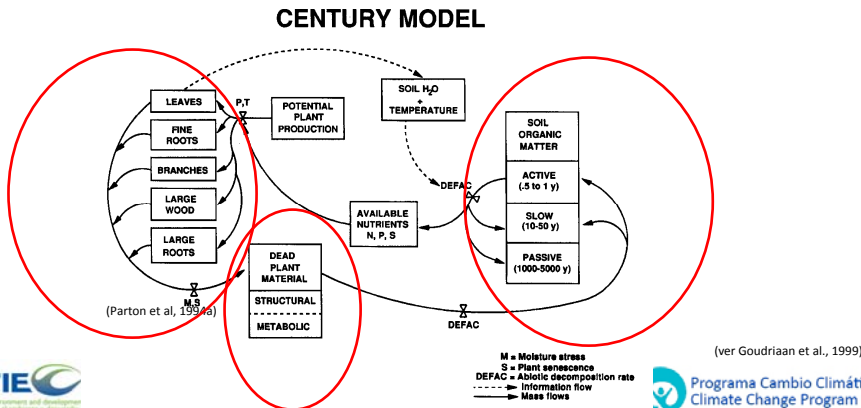


Modelos bioclimáticos: ventajas y desventajas

- Principales críticas (Cramer et al., 1999):
 - No simulan cambios transitorios en la vegetación
 - Indican la dirección del cambio pero no el tiempo
 - Los Biomas no se desplazarán como entidades homogéneas
 - Hay diferencias entre especies según sus nichos y habilidad para migrar que conformaran diferentes ensamblajes a lo largo del tiempo

Ejemplos de enfoques en ecofisiología

- Énfasis:
 - Cambio global=> flujos de C, agua y energía
 - Cambio global => funcionamiento de los ecosistemas



Enfoques en ecofisiología: componentes

- Enfoques

- Modelos de ecosistemas

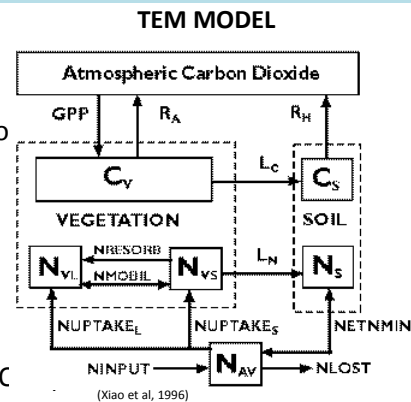
- Ciclo biogeoquímico completo
 - Ejs.: CENTURY, TEM

- Modelos de dosel

- Flujos desde el dosel
 - Ejs: CERES, EPIC, BIOME-BCG

- Énfasis en flujos

- Balance hídrico (CERES, SUCRC)
 - Nutrientes (CERES, SWHEAT...)
 - Materia orgánica del suelo, erosión del suelo (G'DAY)



(ver Goudriaan et al., 1999)

Enfoques en ecofisiología: procesos

- Incremento de CO₂

- Procesos de carbono en los ecosistemas
 - Intercambio neto de CO₂, cuantificación de biomasa, cuantificación y cualificación de hojarasca, descomposición, carbono subsuelo, secuestro de C en el suelo
 - Balance hídrico
 - A nivel del suelo, hoja y dosel
 - Respuestas de la comunidad
 - Biodiversidad (raramente tomada en cuenta en los modelos ecofisiológicos)

- Incremento de temperatura

- Procesos de carbono en los ecosistemas (descomposición y respiración de la materia orgánica del suelo)
 - Escaso conocimiento en bosques tropicales

- Cambio en la disponibilidad de agua

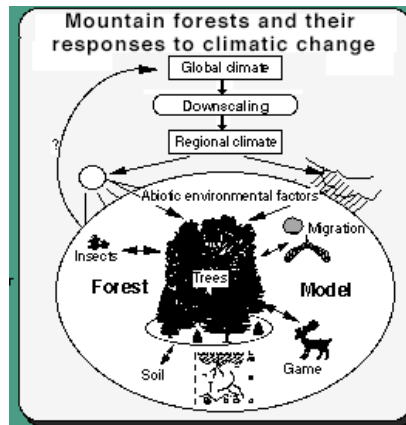
- Pérdida de agua de los ecosistemas a la atmósfera
 - Regulación de la pérdida de agua por las plantas
 - Capacidad de las plantas de aprovechar el agua del suelo

- Alteración en la deposición de Nitrógeno => incremento o decremento en el crecimiento del bosque

(Mooney et al., 1999)

Modelos con énfasis en la composición y estructura de los ecosistemas

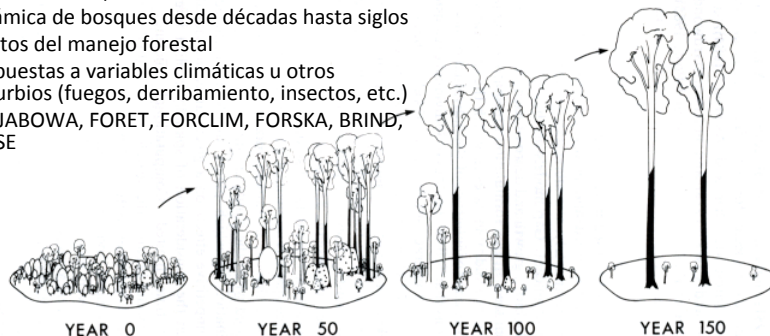
- Cambio global=> composición y estructura de las comunidades
 - Parche
 - Paisaje
 - Biósfera



Estructura y composición: a nivel de parche de bosque

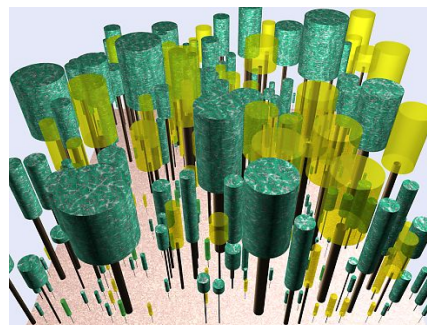
- Modelos de parche de bosque y gap
 - Dinámica de plantas individuales (establecimiento, crecimiento y mortalidad)
 - Establecimiento= f (disponibilidad de propágulos, limitantes ambientales, competencia con otros individuos)
 - Interacción entre plantas (competencia por agua, luz y nutrientes)
 - Dinámica de bosques desde décadas hasta siglos
 - Efectos del manejo forestal
 - Respuestas a variables climáticas u otros disturbios (fuegos, derribamiento, insectos, etc.)
 - Ejs. JABOWA, FORET, FORCLIM, FORSKA, BRIND, MUSE

Moc
198:



Estructura y composición: a escala de paisaje

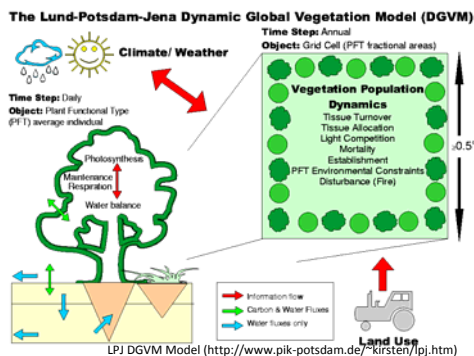
- Modelos de paisaje
 - Parches no interactivos (similares al modelo de parche)
 - Parches espacialmente conectados (p.e. flujos laterales de agua, sombreado)
 - Plantas individuales espacialmente conectadas (demanda computacional)
- Dinámica espacial
 - La mayoría de las perturbaciones y procesos de ecosistemas se dan a escala de paisaje
- Efecto de perturbaciones (fuegos)
 - Patrones de sucesión, dispersión de fuegos, tasa de dispersión para determinar el cambio
 - Efecto del paisaje en la migración
 - Capacidad de migración de las especies
 - Efecto de las actividades humanas



http://www.jamstec.go.jp/frcg/jp/program/ecrp/fig01_1.jpg

Estructura y composición: nivel de biósfera

- Consecuencias de subir de escala: abstracción y simplificación
 - Procesos, diversidad de organismos (tipos funcionales), variabilidad en el tiempo y espacio
- Modelos globales que ligam la estructura y función de los ecosistemas
 - FBM (Frankfurt Biosphere Model)
 - Tipos de vegetación basados en un mapa + simulación dinámica de aspectos estructurales (LAI, biomasa aérea)
 - DOLY, BIOME3
 - Simulan la estructura de la vegetación en lugar de ser impuesta
 - DGVM
 - Modelos Globales Dinámicos de Vegetación
 - Simulan cambios transitorios en la estructura del ecosistema
 - Dinámica de la vegetación es explícita
 - Integración entre procesos biofísicos, ecofisiológicos, biogeoquímicos y biogeográficos
 - E.g.: LPJ, CASA-NASA, IBIS, STOMATE, SDGVM, HYDRID, ORCHIDEE



Complejidad ecológica

- Impactos del CC en los ecosistemas son difíciles de predecir debido a la complejidad del sistema ecológico
- Biodiversidad (genética, especies, paisaje) y la interacción entre elementos del ecosistema influenciará:

- Funciones de los ecosistemas
- Provisión de recursos
- Estructura trófica
- Regímenes de perturbaciones
- Eg: especies invasivas, cadena trófica, presa-predadores...

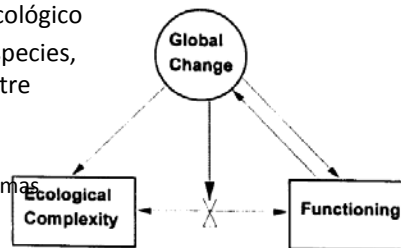


Figure 18.1 The relationship between global change, ecological complexity and ecosystem functioning.

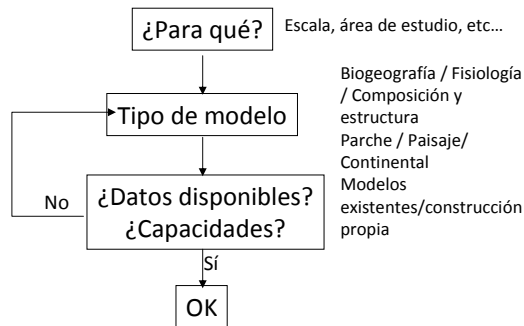
(Sala, 1996)

Conclusiones

- Modelos bioclimáticos
 - Mapas de vulnerabilidad y dirección del cambio (incluyendo el riesgo de especies invasivas)
 - Herramientas y datos disponibles
- Modelos con énfasis en estructura y composición
 - Biodiversidad y complejidad
 - Estructura y composición podría determinar SE (p.e. dispersión de plagas)
- Modelos con énfasis en fisiología
 - Modelos a escala de parche y paisaje: alta demanda de datos
 - Los procesos simulados pueden ser muy sutiles a la vista de algunos SE (agua, belleza escénica)
 - Por ejemplo, aumento del 10% en NPP puede ser importante en escala global (retroalimentación del clima) pero no a nivel local

Modelos para cambios en ecosistemas

- Preguntas
 - Relevancia para estudios locales
 - Escala: la simplificación de modelos globales podría impedir aplicaciones locales
 - Evitar modelos de parche que no pueden subir de escala
- Para la selección:
 - Pensar en datos, tiempo y capacidades



Modelos hidrológicos: Xu y Singh (2004)

- Tipos de modelos para evaluar los recursos hídricos bajo clima estático:
- Método del balance hídrico a largo plazo
 - No puede evaluar la disponibilidad del recurso a nivel estacional o mensual.
 - En zonas secas, los errores pueden ser mayores que los valores de caudales.
- Modelos conceptuales agrupados consideran la humedad del suelo, generalmente a escala diaria o mensual (estacionalidad).
 - flujos entre compartimentos de almacenamiento de agua
 - Algunos usan índices de vegetación que reflejan el crecimiento de la vegetación y sus patrones (Fisher et al., 2008).
- Modelos hidrológicos espaciales asistidos por SIG
 - Permiten evaluar cuencas grandes, diferentes escenarios (CUT)
 - Impacto de contaminantes
 - La cuenca se puede subdividir en “unidades ecológicas de respuesta”
- Bajo escenarios de clima futuro
 - Datos hidro-climáticos producidos por los MCG (resolución gruesa)
 - Datos de los MCG en modelos hidrológicos de macro-escala M
 - Modelos hidrológicos de macro-escala de tierra-superficie que se usan para mejorar modelos climáticos y meteorológicos y se usan acoplados a los MCG.

Modelos hidrológicos: Xu y Singh (2004)

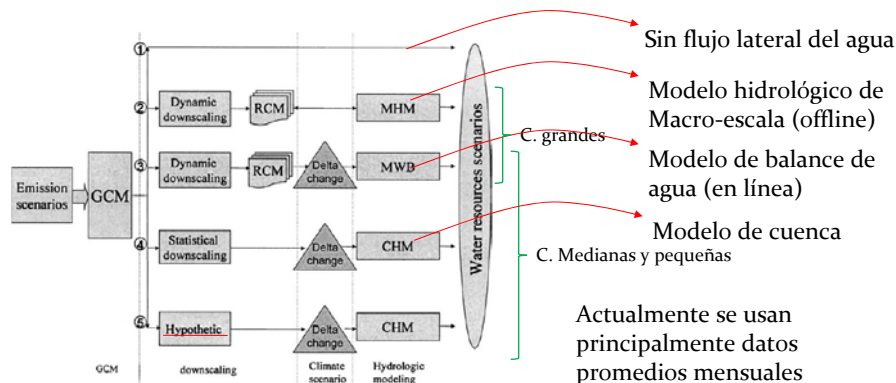
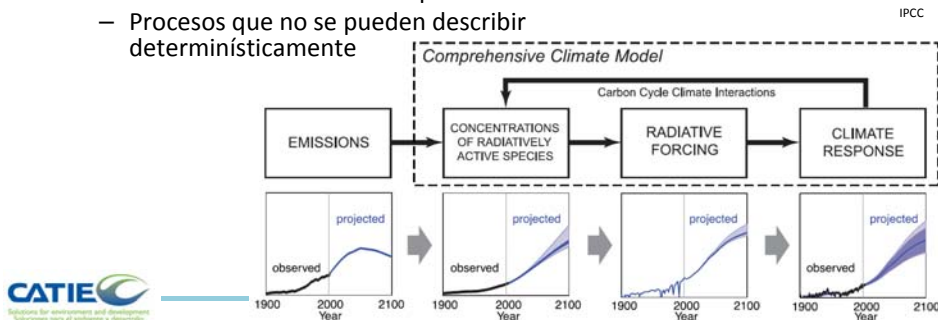


Figure 3. Schematic representation of the methods for assessing water resources under changing climate. In the figure, GCM is the global circulation model, RCM the regional climate model, MHM the macroscale land-surface hydrological model, MWB the macroscale water balance model, CHM the catchment-scale hydrological model. Definitions of various model types are given in Section 3.

Actualmente se usan principalmente datos promedios mensuales derivados de los GCM por lo que se pierde información sobre la variabilidad climática o eventos extremos

Incertidumbre: Peterson 2006

- Incertidumbre de los parámetros
 - Parámetros del modelo
 - Estructura del modelo
 - Interacción de los parámetros
 - Se reduce con la investigación
- En la práctica encontramos incertidumbres en:
 - Rutas de las emisiones
 - Cambio climático
 - Impacto del CC
 - Políticas óptimas
- Incertidumbre estocástica
 - Variabilidad natural de los procesos
 - Procesos que no se pueden describir determinísticamente



Incertidumbre: Peterson 2006

- Ejemplos de clasificaciones

Table 1
Cascade of uncertainties.

| | IPCC [6, Chap. 2] | Heal and Kriström [2] | Molander [8] | Sausen [9] |
|---|--|---|---|--|
| 1 | Emission scenarios (anthropogenic GHG emissions) | Emission scenarios | Basic physical uncertainties | Choice of the emission scenario |
| 2 | Responses of the carbon cycle Sensitivity of the climate to changes in the carbon cycle Regional implications of a global climate scenario | Ecological uncertainty What will the climate be? | Incomplete empirical data on current emission and absorption rates | Calculating the concentration of GHG Determining the climate sensitivity Simulating future climate |
| 3 | Possible range of impacts on human societies | Impacts What does given climate change mean in economic terms? | Effects of a potential climate change on ecosystems | Interpreting the results |
| 4 | | Policies | Uncertainties that affect policy measures Costs and benefits of slowing climate change | Perception of results |


GHG Greenhouse gas, IPCC Intergovernment Panel on Climate Change

Incertidumbre: Katz 2002


- Otro ejemplo:

Table 1. Sources of uncertainty

| Source | Description | Examples |
|---------------------|--|---|
| Measurement error | Random error (precision), systematic error (bias) | Bias in historical measurements of speed of light or mean density of earth |
| Variability | Systematic differences (e.g. over space or time), inherent randomness | Spatial variations in precipitation, unpredictability of weather |
| Model structure | Function form of relationship (linear or nonlinear), specified predictor variables | Crop-climate model (linear or quadratic, missing climate variables) |
| Scaling/aggregation | Spatial or temporal scale (or level of aggregation) of model or data | Tuning model parameters to spatial or temporal scale, support of GCM output |



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo



Programa Cambio Climático
Climate Change Program

Incertidumbre: Katz 2002

- Métodos para su estimación
 - Análisis de sensibilidad
 - Análisis de escenarios
 - Simulaciones Monte Carlo
 - La probabilidad del resultado se estima de las probabilidades de los insumos del modelo
 - Métodos de muestreo de la probabilidad de los insumos
- Métodos Bayesianos
 - pdf posteriori = f(pdf a priori, likelihood function según observaciones)
 - Métodos estocásticos jerárquicos
 - Cadenas de Markov - Monte Carlo (MCMC)

Table 2. Techniques for uncertainty analysis

| Type | Description | Advantages | Disadvantages |
|---------------------------------|---|------------------------------------|--|
| Sensitivity analysis | Partial derivative of model response with respect to input | Straightforward, intuitive appeal | Ignores uncertainty in input |
| Scenario analysis | Model output for trial values of inputs | Straightforward, pedagogical value | Inadequate mechanism for determining uncertainty |
| Monte Carlo simulation analysis | Simulated distribution for output as function of input distribution | Formal probabilistic approach | Computational burden, model uncertainty ignored |

Incertidumbre: Katz 2002

- Métodos para su comunicación
 - No presentarla
 - Presentarla en términos cuantitativos
 - Diferentes percepciones del mismo término
 - Probabilidades o frecuencias absolutas?

Table 3. Examples of use of uncertainty analysis in climate change studies

| Type (source) | Application | Results |
|--|---|--|
| Sensitivity analysis (Mearns et al. 1996) | CERES-Wheat model used to determine sensitivity of crop yields to climate variability | Demonstrated importance of effects of climate variability on crop yields |
| Scenario analysis (Alcamo & Kreileman 1996) | IMAGE global change model used to evaluate effectiveness of emission pathways | Identified 'safe emission corridors,' relating emission pathways to climate protection goals |
| Monte Carlo simulation analysis (Shackley et al. 1998) | EL global carbon cycle model used to evaluate effects of parameter uncertainty on carbon dioxide levels | Previous studies underestimated uncertainty in projected carbon dioxide levels |

Manejo de la Incertidumbre: IPCC

- Incertidumbre:
 - Valores: exactitud de los valores, se calculan con técnicas estadísticas para tener probabilidades
 - Estructurales: entendimiento de los procesos o relaciones, se calculan con base en el juicio colectivo de los expertos y su confianza en los resultados

| Confidence Terminology | Degree of confidence in being correct | |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Very high confidence | At least 9 out of 10 chance | Entendimiento científico |
| High confidence | About 8 out of 10 chance | |
| Medium confidence | About 5 out of 10 chance | |
| Low confidence | About 2 out of 10 chance | |
| Very low confidence | Less than 1 out of 10 chance | |

| Likelihood Terminology | Likelihood of the occurrence/ outcome | |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| Virtually certain | > 99% probability | Probabilidad de resultados específicos |
| Extremely likely | > 95% probability | |
| Very likely | > 90% probability | |
| Likely | > 66% probability | |
| More likely than not | > 50% probability | |
| About as likely as not | 33 to 66% probability | |
| Unlikely | < 33% probability | |
| Very unlikely | < 10% probability | |
| Extremely unlikely | < 5% probability | |
| Exceptionally unlikely | < 1% probability | |

Incetidumbre: IPCC, WGI = T

- Tebaldi *et al.*, 2004: modelos bayesianos para el conjunto de modelos bajo un SRES (A1B)
- Greene *et al.*, 2006: se construyen funciones de ajuste entre el clima observado y las simulaciones del clima observado para los diferentes modelos, los coeficientes e incertidumbres se aplican a los escenarios futuros para obtener las PDFs

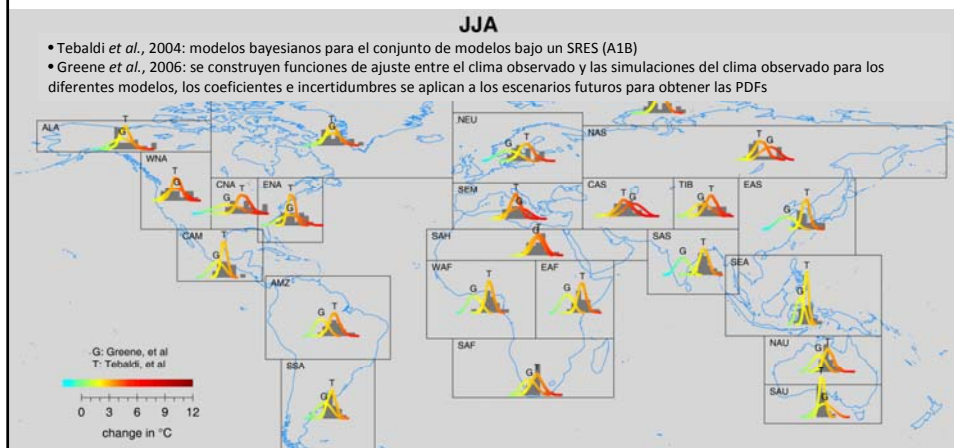
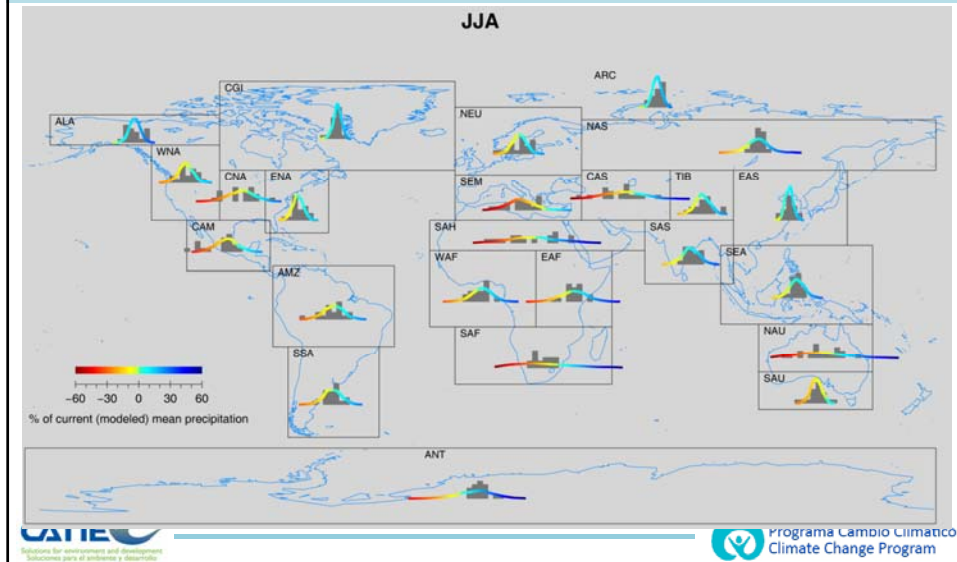


Figure 11.26. Map comparing PDFs of change in temperature (2080 to 2099 compared to 1980 to 1999) from Tebaldi *et al.* (2004a,b) and Greene *et al.* (2006) as well as the raw model projections (represented by shaded histograms) for the Giorgi and Francisco (2000) regions. Areas under the curves and areas covered by the histograms have been scaled to equal unity. The scenario is SRES A1B and the season is NH winter (DJF). Asterisks adjacent to ARC and ANT regions indicate that only the Tebaldi *et al.* results were available.

Incertidumbre: IPCC, WGI = P



Incertidumbre: IPCC, WGI = P

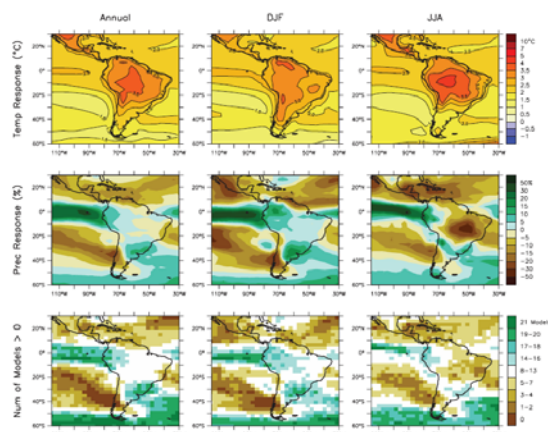
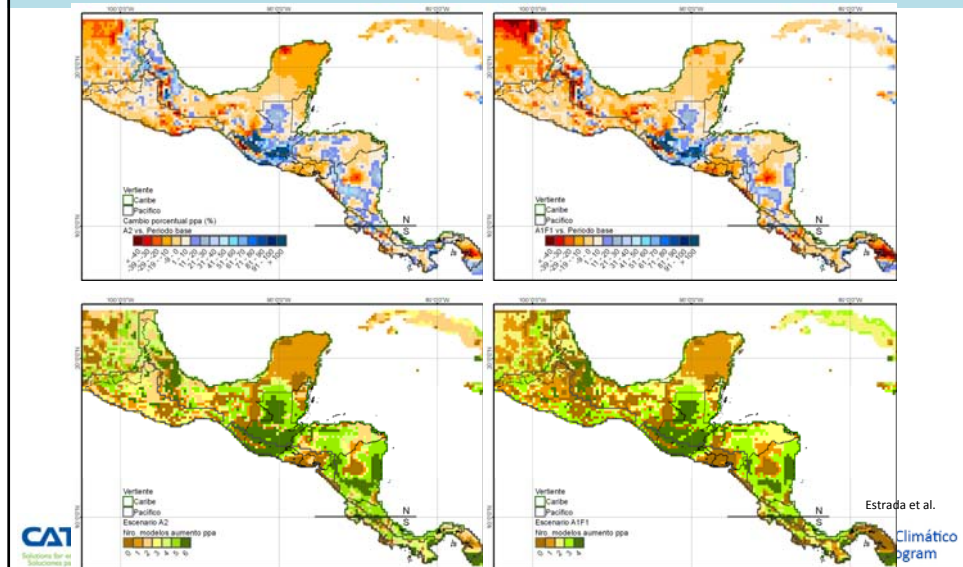


Figure 11.15. Temperature and precipitation changes over Central and South America from the MMD-418 simulations. Top row: Annual mean, DJF and JJA temperature change between 1980 to 1999 and 2080 to 2099, averaged over 21 models. Middle row: same as top, but for fractional change in precipitation. Bottom row: number of models out of 21 that project increases in precipitation.

Incertidumbre: Centroamérica



Scholze et al., 2006

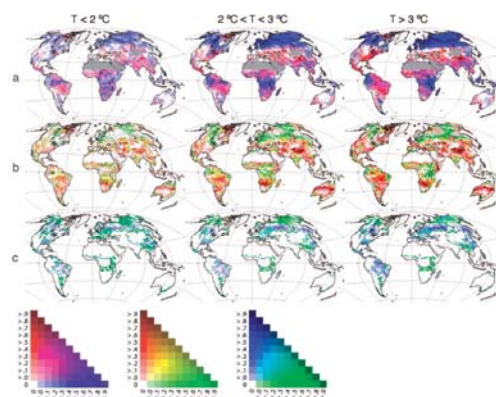


Fig. 2. Probability of exceeding critical levels of change between 1961-1990 and 2071-2100 for three levels of global warming. For quantitative variables (freshwater runoff and wildfire frequency), critical change is defined where the change in the mean of 2071-2100 exceeds $\pm 1\sigma$ of the observed (1961-1990) interannual variability. (a) Freshwater runoff (blue for increase, red for decrease; mixed colors show cases where different runs produce changes in opposite directions, i.e., there are runs of both exceeding the critical level by $\pm 1\sigma$ as well as by $\pm 1\sigma$). Gray areas denote grid cells with $< 10 \text{ mm} \text{ yr}^{-1}$ mean runoff for 1961-1990. (b) Wildfire frequency (red, increase; green, decrease). (c) Biomass change from forest to nonforest (blue) or vice versa (green). For wildfire frequency and biomass change, colors are shown only for grid cells with $> 75\%$ cultivated and managed areas.

Dessai y Hulme, 2007

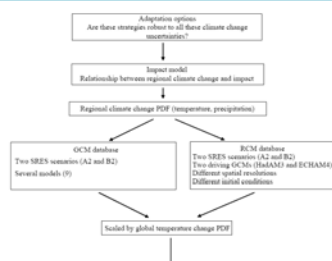
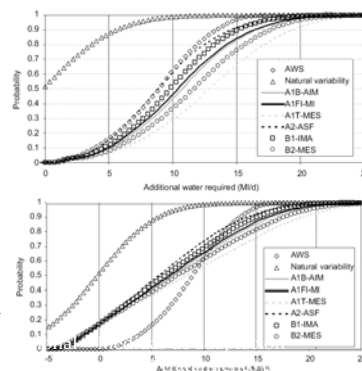


Table 7
Quantification of the uncertainty introduced by the parameters sampled in the assessment using the default scheme (with GCMs) in terms of additional water required (MI/d) for the East Suffolk & Essex WRZ (at the 95th percentile)

| Parameter | Uncertainty range (MI/d) | AWS shortfall (MI/d) |
|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| GHG emissions scenario | 5.55 | 7.35 |
| Climate sensitivity | 8.27 | 9.39 |
| Aerosol forcing | 7.53 | 5.63 |
| Ocean diffusivity | 2.69 | 3.74 |
| Carbon cycle | 2.91 | 4.01 |
| Regional climate response GCMs (RCMs) | 22.66 (14.88) | 7.28 (9.10) |
| Climate impacts | 8.28 | 6.06 |

Also shown is AWS's WRP shortfall, i.e., the difference between the most extreme PDF₂ scenario or value sampled for each parameter and the triangular PDF AWS used in its planning at the 95th percentile.



Muchas Gracias!